

デンマーク工科大学 (DTU) における 光通信関連研究プログラムと日本との研究連携



デンマーク工科大学
フォトニクス工学科 教授

Leif Katsuo Oxenløwe



デンマーク工科大学
フォトニクス工学科 教授

もりおが としお
盛岡 敏夫

1. はじめに

本稿では、デンマーク工科大学 (DTU) における光通信技術関連のCoE (Center of Excellence) プログラムである、SPOC (Center for Silicon Photonics for Optical Communications) とNATEC (NAnophotonics for TErabit Communications) とその最近の研究成果について紹介する。併せて、これまでの日本の諸機関とDTUの光通信分野での連携についても紹介する。

2. DTU Fotonikにおける光通信関連CoEプログラム

DTU Fotonik (DTUフォトニクス工学科: <http://www.fotonik.dtu.dk/english>) は、フォトニクスに特化した専門の学科で、ナノフォトニクス、光源/産業用センサー、非線形光学/バイオフォトニクス、通信技術の4つのセクションに分かれており、現在、14のグループで構成されている。職員である博士課程学生約90名を含めて、学科の全職員数は約220名で、その他、修士課程の学生数は、約40名である。筆者らは、High-Speed Optical Communications Group (グループリーダー: Leif Katsuo Oxenløwe) に属し、非線形光信号処理、シリコンフォトニクス、デジタル信号処理、光空間多重技術、超高速光伝送、テラヘルツフォトニクスなどの研究を行っている (<http://www.fotonik.dtu.dk/english/Research/Communication-technologies/HighSpeed>)。

SPOC (<http://www.spoc.dtu.dk/>) は、DNRF (Danish National Research Foundation) のCoEプログラム (期間: 2015年~2020年、委託額: 約10億4千万円) で、物理学、非線形光学、光通信技術、先端符号化技術や信号理論などを学際的に融合し、将来の光通信インフラに資する技術を創出すること目的にしている。フォトニックワイヤを用いた光信号処理による帯域/エネルギー効率の格段の向上、究極の光通信容量を実現するための光シリコンチップと光集積技術、光通信容量の格段の向上、周波数利用効率の

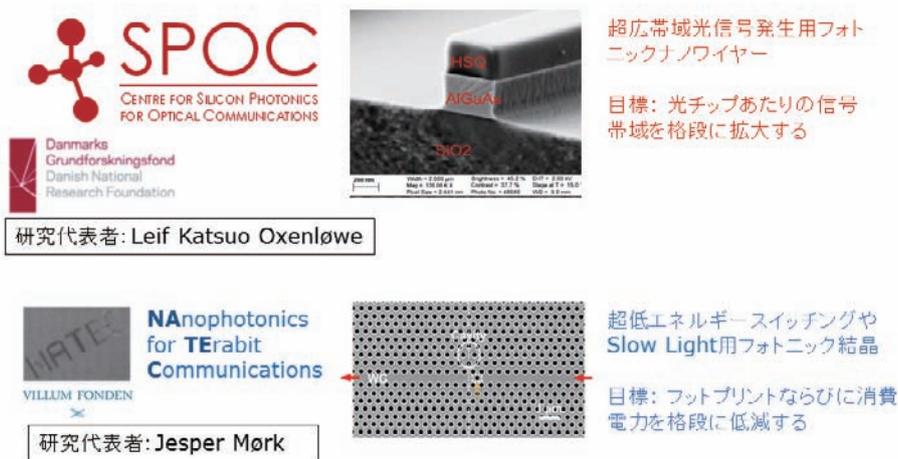
最適化のための信号符号理論、超精密光クロック、周波数基準のための光周波数コム、将来の高セキュリティ量子通信チャネルの研究を行っている。国内パートナー機関としては、コペンハーゲン大学ニールスボーア研究所があり、国外では、シドニー大学 (オーストラリア)、カリフォルニア大学サンタバーバラ校、ボストン大学 (米国)、ゲント大学 (ベルギー)、ブリストル大学 (英国)、ミュンヘン工科大学 (ドイツ) などの大学と研究連携している。

NATEC (<http://www.natec.dtu.dk/>) は、Villum Kann Rasmussen FoundationのCoEプログラム (第1期2008年~2014年、第2期2014年~2020年、委託額: 約9億7千万円) で、テラビット級通信に用いる量子ドットやフォトニック結晶デバイスの基礎理論、デバイス作製、評価からシステム実験を行うことを目的にしており、学内のDTU Mekanik (機械工学科)、DTU DANCHIP (National Center for Micro and Nanofabrication)、DTU Elektro (電気工学科) と連携して研究を進めている。研究分野としては、消費エネルギー低減技術、超高速ナノ光スイッチ、Slow lightフォトニック結晶増幅器、フォトニック結晶レーザ、フォトニック結晶光検出器、ハイブリッドレーザ/光検出器、トポロジー最適化、シリコンマイクロリング共振器を用いた光信号処理、量子閉じ込め構造の作製と評価、単一量子ドット構造のダイナミクスなどがある。図1に、これらDTU Fotonikにおける光通信関連のCoEプログラムを模式的に表す。

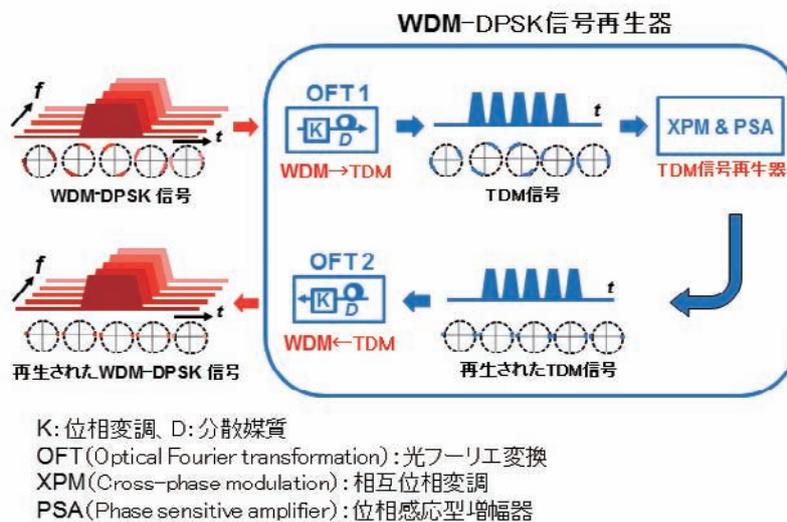
3. 最近の研究成果

3.1 WDM信号の一括信号再生

WDM信号の信号再生には、波長チャネルごとの処理が必要となるが、ここでは、時間レンズによる光フーリエ変換作用を用いて、WDM信号からTDM信号への変換後、TDM信号領域で一括信号再生し、再び、TDM信号からWDM信号への変換を行うことで、16チャネルのWDM信



■ 図1. DTU Fotonikにおける光通信関連のCoEプログラム



■ 図2. 時間レンズによる光フーリエ変換を用いたWDM信号一括再生器

号の一括信号再生を実現した^[1]。図2に、原理を模式的に表す。TDM信号の再生には、光ファイバによるXPM（相互位相変調）とPSA（位相感応型増幅器）を用いている。

3.2 単一光源による661Tbit/s伝送

SPOC、NATECプロジェクトとEU-Japan連携研究開発プログラムであるSAFARI (Scalable and Flexible optical Architecture for Reconfigurable Infrastructure : <http://www.ict-safari.eu/>) プロジェクトとの連携により、単一光源による661Tbit/s伝送を実現した^[2]。661Tbit/sは、単一のチップ光源を用いたデータ伝送量としては、これまでで最大である。まず、図3に示すように、NATEC、SPOCで開発したAlGaAsナノワイヤ非線形光導波路にピコ秒パルスを入射し、約40nmに光スペクトルを拡大してWDM信号を生成した。WDM信号としては、80チャンネル、40Gbaud、PDM-16QAMを用い、伝送路としては、SAFARIで開発した9.6kmの低

クロストークの30コアのマルチコアファイバを用いた。

なお、本成果はSAFARIプロジェクトの成果と併せて Horizon Prize : Breaking the optical transmission barriersに応募し、フジクラ、サウサンプトン大学と同賞を欧州委員会から受賞した。

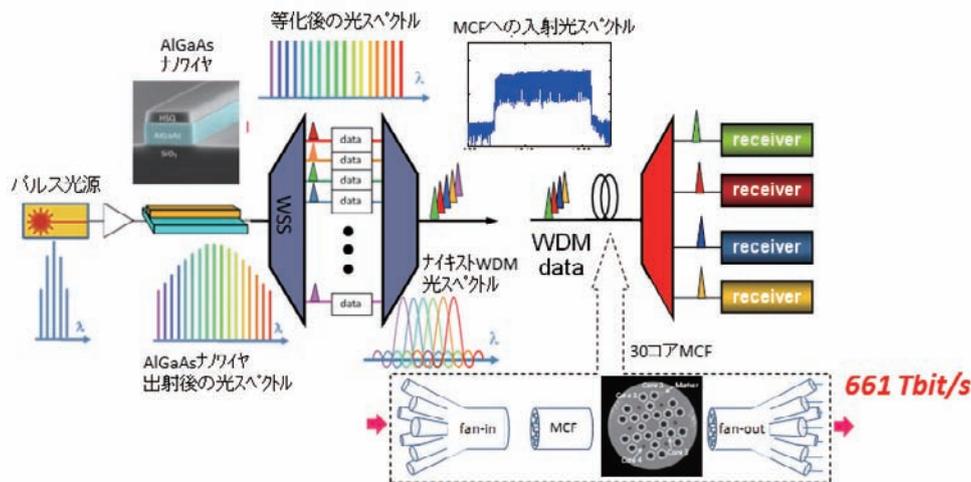
(<https://ec.europa.eu/research/horizonprize/index.cfm?prize=optical-transmission>)

3.3 多次元の量子鍵配送システム

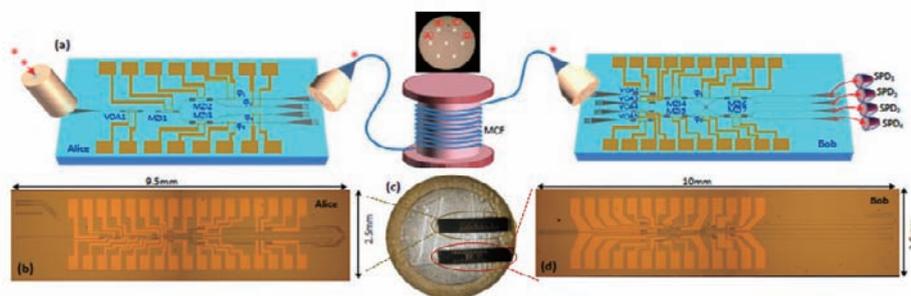
図4に示すように、シリコン導波路による多次元の量子鍵配送送受信器とマルチコアファイバを組み合わせ量子鍵配送法を実証した^[3]。4つの空間チャンネルによる拡張BB84プロトコルを用い、キー速度を2倍にすることに成功している。

4. 日本との研究連携

DTUは、光通信分野で1970年代後半から日本の研究



■図3. 単一光源による661 Tbit/s伝送 WSS: 波長選択スイッチ、MCF: マルチコアファイバ



■図4. 多次元の量子鍵配送システム (a) 実験系、(b) 送信用シリコン導波路 (Alice)、(d) 受信用シリコン導波路 (Bob)、(c) 大きさの比較の為の1ユーロコイン。VOA: 可変光アッテネータ、MZI: マッハツェンダー干渉計、MCF: マルチコアファイバ、SPD: 単一光子検出器

者、研究機関と約40年間の交流をさせていただいている。デンマークにおける光通信研究を立ち上げたProf. Palle Jeppesen (現DTU名誉教授)により、1976年の半導体レーザー国際会議(日本・合歓の郷)において、東工大末松教授(現同名誉教授)との交流が始まり、1983年には、Danish Academy of Technical Sciencesから、末松教授にValdemar Poulsen Gold Medalが授与されている。この間、1979年～1981年には、Prof. Kristian Stubkjær (現DTU Elektro所長)が、DTUの博士課程学生として、末松研究室に研究滞在している。その後、NTT、KDDI、富士通研究所、電線メーカ各社、通信機器メーカ各社、東工大、東北大、東大、早稲田大、九州大、東京理科大、物質研、産総研、NICTなどと研究連携、人的交流を進めてきた。2013年には、東北大中沢研究室から、Pyungu Guan氏が、High-Speed Optical Communications Groupに加わり、2014年～2017年には、EU-Japan連携研究開発プログラムであるSAFARIプロジェクトにおいて、NTT、フジクラ、サウサンプトン大(英国)、コリアント(ドイツ)と連携し、30コア以上の高密度マルチコアファイバ、マルチコア光アンプ、高密度空間多重ネットワーク制御技術に関する研究を推進した。今後も光

通信技術の各分野で、関係諸機関との連携を進めていきたい。

5. おわりに

DTUにおける光通信技術関連のCoEプログラムである、SPOCとNATECについて紹介し、最近の研究成果について概説した。併せて、日本の諸機関との光通信分野での連携についても紹介した。

参考文献

- [1] P. Guan et al., "16 Channel WDM Regeneration in a Single Phase-Sensitive Amplifier through Optical Fourier Transformation," ECOC 2016, Post Deadline Paper Th.3.B.3 16 (2016).
- [2] H. Hu et al., "Single-Source AlGaAs Frequency Comb Transmitter for 661 Tbit/s Data Transmission in a 30-core Fiber", CLEO 2016, Post Deadline Paper JTh4C.1 (2016).
- [3] Y. Ding, D. Bacco et al., "High-Dimensional Quantum Key Distribution based on Multicore Fiber using Silicon Photonic Integrated Circuits," NPJ Quantum Information : 3:25 (2017).